بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی- عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Uteدر ایالات متحده آمریکا)*

(یادداشت پژوهشی)

مهدی اژدری مقدم[(۱)]   احسان جعفری ندوشن[(۲)]

چکیده *سرریزهای کنگره‌ای به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی ماکزیمم محتمل با مشکل روبه‌رو هستند مطرح می‌شوند. از مزایای این نوع سرریزها می‌توان به بالا بودن ظرفیت سرریز، هوادهی آسان جریان و پایین بودن نوسانات سطح آب در آستانه‌ی عبوری جریان از روی سرریز اشاره کرد. بنابراین، استفاده از بهینه‌ترین شکل هندسی که بیش‌ترین گذردهی جریان تحت شرایط خاص هیدرولیکی همراه با کاهش هزینه‌ی ساخت را داشته باشد امری ضروری است. به این منظور در این تحقیق از قابلیت سیستم استنتاج فازی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن هندسه‌ی سرریز و ارضای شرایط هیدرولیکی مناسب استفاده گردید. برای ساخت سیستم استنتاج فازی و سپس محاسبه‌ی ضریب گذردهی جریان بر پایه‌ی الگوهای ورودی- خروجی در دست‌رس، از مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی ANFISاستفاده گردید. در این بخش در مدل ANFIS به آموزش داده‌های ورودی زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز در امتداد جریان(α)، طول دماغه (A) و نسبت ارتفاع کل آب به ارتفاع سرریز($\frac{H_t}{p}$) و خروجی ضریب گذردهی جریانCd با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود پرداخته شد. در نهایت با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک و با استفاده از خروجی مدل ANFIS به بهینه یابی هندسه‌ی سرریز با تعریف تابع هدف کمینه‌ی سازی هزینه‌های (حجم بتن‌ریزی) سرریز با ارضای شرایط هیدرولیکی مناسب پرداخته شد.*

واژه‌های کلیدی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، بهینه‌یابی هندسه‌ی سرریز، مدل فازی- عصبی، الگوریتم ژنتیک.

Optimization of Geometry of trapezoidallabyrinth Spillway with using ANFIS Models and Genetic Algorithms (Ute Dam Case Study in the United States of America)

M. Azhdary Moghaddam   E. jafari nodoushan

Abstract *Labyrinth spillway is an appropriate option to pass PMF discharge. The most advantages of this type of spillway are higher discharge capacity, easy aeration as well as low fluctuations of flow surface. It is essential to find the optimum geometry considering the maximum passing discharge under specific hydraulic conditions with minimum construction cost. In this study, fuzzy inference system (FIS) and genetic algorithm (GA) were used to optimize the spillway's geometry and satisfy the hydraulic conditions. Applying FIS to evaluate coefficient based on available input - output pattern, ANFIS was employed. Finally, based on GA and ANFIS model output a cost function was defined to minimize the expense under appropriate hydraulic condition.*

Key Words Trapezoidal Labyrinth Spillway, Optimization of Spillway Geometry, ANFIS, Genetic Algorithms.

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۷/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۰/۱۰/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده‌ی فنی، گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

مقدمه

سرریزهای کنگره‌ای از جملـه سـازه‌هـای هیـدرولیکی برای تنظیم سـطح آب و کنتـرل جریـان در کانـال‌هـا، رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌شمار می‌آیند. محور تـاج این نوع سرریزها به‌صورت مستقیم است و در نمـایش سـطح افقـی، سـرریز از دیـواره‌هـای متصـل بـه هـم تشکیل‌شده و با هندسه‌ی مثلثی، ذوزنقه‌ای، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان تکرار می‌گردد. معیار اصلی در طـرح کنگـره‌ای سـرریزها، افـزایش ظرفیـت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به‌ازای ارتفـاع معین سطح آب در بالادست سرریز بوده است. سابقه‌ی ساخت سـرریزهای کنگـره‌ای بـه قبـل از سـال ۱۹۲۰ می‌رسد [1]، لیکن تا قبل از سال ۱۹۶۸ مطالعات اندکی به‌منظور بررسی و شناخت رفتار هیدرولیکی ایـن نـوع سرریزها انجام شده است. اکثر تحقیقات صورت‌گرفتـه بر سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و ذوزنقه‌ای‌شکل در پلان مـی‌باشـند. اولـین مطالعـه بـر سـرریزهای کنگـره‌ای به‌وسیله‌ی تیلور در سال ۱۹۶۸ انجام گرفت[2]. هـی و تیلور در سـال ۱۹۷۰ روشـی بـرای محاسـبه‌ی دبـی و طراحی این نوع سرریزها ارائه نمودند [۳]. در ادامـه‌ی مطالعات آن‌ها، روش دیگـری بـه‌وسـیله‌ی دارواس در سال ۱۹۷۱ برای طراحی این سرریزها ارائه گردید [1]. پس از سال ۱۹۸۰ مؤسسـات تحقیقـاتی و فنـی دیگـر مانند دانشگاه جورجیا، اداره‌ی عمـران ایـالات متحـده (USBR) و مرکز تحقیقات آب دانشگاه یوتا مطالعـات جامع‌تری را انجام دادند. مطالعاتی تجربـی نیـز توسـط لاکـس و هینچلـوف (۱۹۸۵)، ماگـالاس (۱۹۸۵) و تولیس و امانیان (۱۹۹۵) انجام گردیده است [1,4,5].

مهم‌ترین امتیازات توسـعه‌ی کـاربرد سـرریزهـای کنگره‌ای در رودخانه‌ها و مخازن سدها عبارتند از:

۱- محدودیت عرضـی مقطـع احـداث سـرریز جهـت انتقال سیلاب ماکزیمم طراحی در مخازن سـدها و نیز در شرایط رودخانه‌هـای نیمـه‌کوهسـتانی و یـا رودخانه‌های سیلاب دشتی با مقطع مرکب.

۲- محدودیت ارتفاع سـطح آب در بـازه‌ی بـالادسـت سـرریز و خطـر آب‌گرفتگـی اراضـی بـالادسـت به‌خصوص در رودخانه‌ی سیلاب دشتی.

۳- افزایش حجم مفید مخزن سـدها از طریـق افـزایش ارتفاع ثابت سرریز با تأمین ظرفیت انتقال سـیلابی سرریز.

٤- اصلاح و توسعه طرح سـرریزهای موجـود جهـت افزایش ظرفیت انتقال سیلاب؛ و

۵- سادگی ساخت، توجیه برتـر اقتصـادی و سـهولت مدیریت بهره‌برداری در مقایسه با گزینه‌ی سـرریز خطی با کنترل دریچه‌ای [1,2].

با توجه به مزایای ذکرشده در مـورد سـرریزهـای کنگره‌ای هدف این تحقیق بهینه کـردن هندسـه‌ی ایـن نوع سرریز با توجـه بـه شـرایط ذکـرشـده در تحقیـق می‌باشد. به همین منظور از مدل سیستم استنتاج فازی- عصـبی ANFIS و الگـوریتم ژنتیـک بـرای بهینـه‌یـابی استفاده گردیده است. بـرای سـاخت سیسـتم اسـتنتاج فازی و سپس محاسبه‌ی ضریب گـذردهی جریـان بـر پایه‌ی الگوی ورودی و خروجی در دست‌رس می‌توان از مدل ANFIS بهره جست. برای این منظور مجموعاً ۹٦ زوج داده استفاده گردید که ۸۰ درصد داده‌ها بـرای آموزش مدل ANFIS و ۲۰ درصد داده‌ها برای ارزیابی مدل به‌کار گرفته شده است. در مدل ANFIS با استفاده از داده‌های موجود شـامل سـه متغیـر ورودی زاویـه‌ی دیوار سرریز در امتداد جریان و نسبت ارتفـاع کـل آب بـه ارتفـاع سـرریز ($\frac{H_t}{p}$) ، طـول دماغـه (A) و متغیـر خروجی ضریب گذردهی جریان (C_d) به ساخت مـدل فازی عصـبی ANFIS پرداختـه شـد. بـدین صـورت می‌توان با اسـتفاده از مـدل سـاخته شـده بـه محاسـبه ضـریب گـذردهی جریـان از روی داده‌هـای ورودی جدید پرداخـت. بـا بـه‌کـارگیـری الگـوریتم ژنتیـک و تعریف تابع هدف کمینـه‌سـازی هزینـه‌ی (حجـم بـتن

ریزی) سرریز با ارضای شرایط هیدرولیکی دل‌خـواه و مناسب به بهینه‌یابی هندسه‌ی سرریز پرداخته شد.

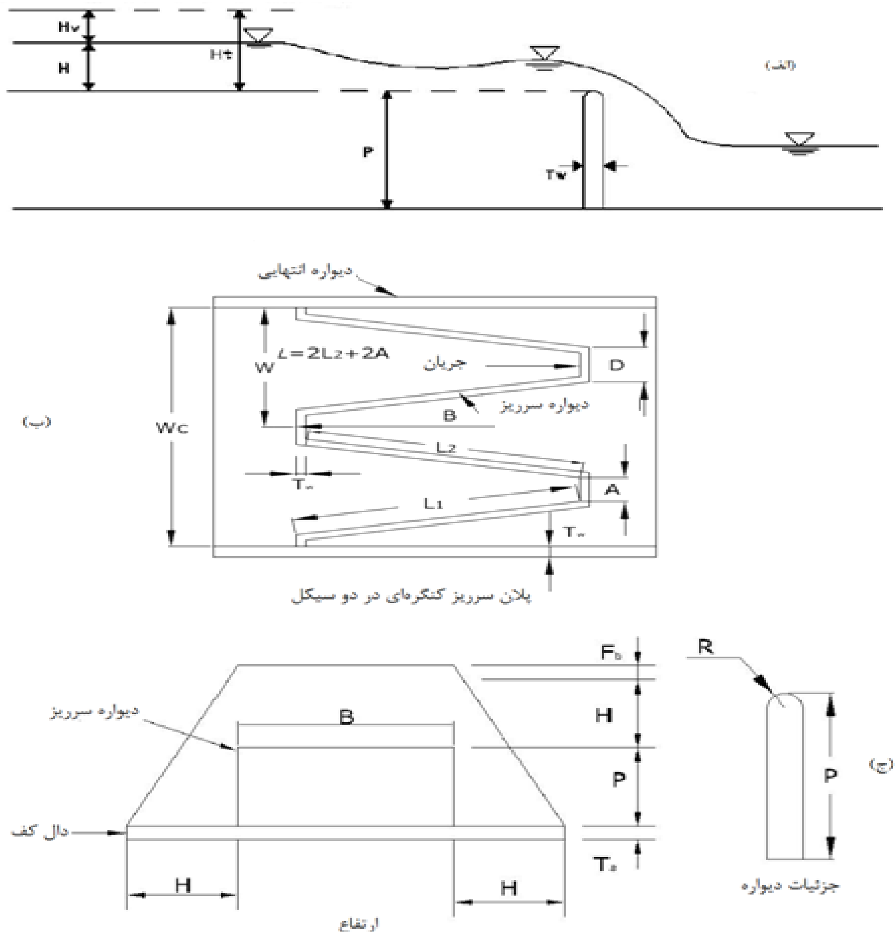
بررسی پارامترهای سرریز کنگره‌ای

ظرفیت یک سرریز کنگره‌ای، تابعی از هـد کـل، طـول سرریز و ضـریب تخلیه‌ی سـرریز مـی‌باشـد. ضـریب تخلیه‌ی سرریز نیـز بـه ارتفـاع کـل آب (H_t)، ارتفـاع سرریز (P)، ضخامت سرریز(T_w)، شکل تاج و زاویه‌ی دیواره‌ی سـرریز در امتـداد جریـان (α) بسـتگی دارد.

رابطــه‌ی محاســبه‌ی دبــی در ســرریزهای کنگــره‌ای به‌صورت زیر می‌باشد [2] .

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_e \sqrt{2g} H_t^{1.5} \qquad (۱)$$

کـه در آن C_d ضـریب تخلیـه، $Q(m^3/s)$ دبـی، H_t ارتفاع کل آب، و L_e طول مؤثر مـی‌باشـند. شـکل (۱) نمای شماتیک از پروفیل جریان عبوری از روی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای در مقطع و پلان را نمایش می‌دهد،



شکل ۱ نمایش پروفیل جریان عبوری از روی سرریز کنگره ای،(الف) پلان سرریز کنگره ای ذوزنقه‌ای،(ب)مقطع سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای

طول واقعی دیواره سرریز (L_1) Actual Length of Side Leg	طول موثر دیواره سرریز (L_2) Effective Length of Side Leg
ضخامت سرریز (T_W)	طول سرریز (B) (Length of Labyrinth)
عرض کل سرریز (wc)	طول سرریز در یک سیکل (l)
عرض هر سیکل سرریز (w)	تعداد سیکل‌ها (N) (Number of cycles)

پارامتر های لازم برای طراحی و بهینه‌سازی

نسبت هد آبی(Headwater Ratio). نسبت هد آبی برابر حاصل تقسیم هد کل به ارتفاع سرریز ($\frac{H_t}{P}$) می‌باشد. به‌دلیل این‌که ضریب تخلیه با افزایش هد کل کاهش می‌یابد لذا بالاترین کارایی سرریزهای فوق در هدهای کم می‌باشد. حداکثر نسبت هد آبی کل بیش‌تر به‌صورت پاسخ مدل‌های آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود. حداکثر نسبت هد آبی برای آزمایشات تولیس و امانیان معادل $\frac{H_t}{P} < 0.9$ درنظر گرفته می‌شود [2] .

نسبت ظاهری عمودی (Vertical Aspect Ratio/Sidewall Angle). نسبت ظاهری عمودی برابر حاصل تقسیم عرض هر یک از سیکل‌های سرریز به ارتفاع سرریز($\frac{W}{P}$) می‌باشد. تیلور به‌منظور کاهش اثرات تلاقی جت‌های آب نسبت ظاهری عمودی را بزرگ‌تر از ۲ پیشنهاد کرد [4]. برای اهداف طراحی مقادیر حداقل ۲ و ۲/۵ به‌ترتیب برای پلان‌های ذوزنقه‌ای و مثلثی توسط لوکس پیشنهاد گردید [5].

نسبت بزرگنمایی (Magnification Ratio). نسبت بزرگ‌نمایی به‌صورت حاصل تقسیم طول تاج سرریز کنگره‌ای در یک سیکل به عرض هر سیکل سرریز ($\frac{l}{w}$) می‌باشد. در آزمایش‌های انجام‌شده توسط تولیس و امانیان حداقل زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز در امتداد جریان شش درجه می‌باشد که معادل نسبت بزرگ‌نمایی حدوداً ۹/۵ می‌باشد [5].

زاویه دیوار هادی(Sidewall Angle). در یک سرریز کنگره‌ای مثلثی و ذوزنقه‌ای زاویه دیواره‌های هادی در امتداد جریان (α) به ترتیب در رابطه (۳و۲) نشان داده شده است [1].

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{w}{2L_2}\right) \quad (۲)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{w-2A}{2L_2}\right) \quad (۳)$$

شکل تاج (Crest Shape). در این تحقیق با توجه به مطالعات انجام شده توسط امانیان (۱۹۹۵) بهترین شکل تاج که بیش‌ترین گذردهی را دارا می‌باشد، تاج نیم دایره‌ای انتخاب شده است [2].

نسبت دماغه (Crest Shape). با کاهش نسبت $\frac{A}{w}$ کارایی سرریز افزایش می‌یابد اما از طرف دیگر تداخل لایه‌های سرریزشونده تأثیر منفی بیش‌تری روی عملکرد سرریزهای با پلان مثلثی نسبت به سرریزهای با پلان ذوزنقه‌ای دارد. بنابراین، به‌دست آوردن طول دماغه‌ی مناسب که هم کارایی سرریز را افزایش دهد و هم از تداخل لایه‌های سرریزشونده جلوگیری کند، امری ضروری است. بنابراین، در این تحقیق از سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با طول دماغه‌های مختلف استفاده گردید تا با انتخاب مناسب دماغه بهینه‌ترین حالت که کارایی بیش‌تری را داراست حاصل گردد.

نسبت طول آشفتگی (تداخلی). نسبت طول آشفتگی به طول دیواره‌ی هادی اهمیت بسیار زیادی را برای محدود کردن اثرات تداخل جت‌ها ایفا می‌کند. ایندوکوفر و رو (Indlekofer&Rouve) (۱۹۷۵) با انجام آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که زاویه‌ی تداخل یا ناحیه‌ی آشفتگی تابعی از ارتفاع آب روی سرریز (H)، ارتفاع سرریز(P)، و زاویه‌ی دیواره‌ی

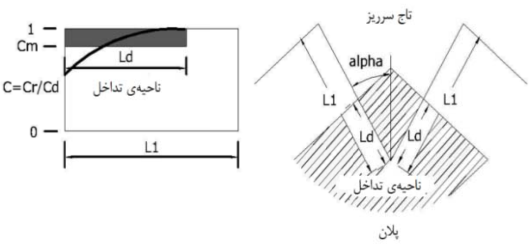
هادی در امتداد جریان (α) می‌باشد. طول تداخل تابعی از طول سرریز L_1 و زاویه‌ی دیواره‌ی هادی است. بنابراین، طول تداخل را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (٤) بیان کرد. در شکل (۲) ناحیه‌ی تداخل جریان نشان داده شده است.

$$L_d = f(H, p, \alpha) = f(\frac{H}{p}, \alpha) \quad (٤)$$

ایندکوفر و رو به این نتیجه رسیدند که طول آشفتگی به‌صورت خطی با افزایش ارتفاع آب روی سرریز افزایش می‌یابد [1].

براساس مدل‌های مطالعاتی سرریز کنگره‌ای ایندکوفر و رو نسبت طول آشفتگی مؤثر به طول دیواره‌های هادی بایستی کوچک‌تر یا مساوی ۰/۳ باشد. بیان دیگر مطلب اخیر به‌صورت رابطه‌ی (۵) ارائه شده است [1].

$$\frac{L_{de}}{L_1} = \frac{H}{L_1} \times 6.1 \times e^{-0.052\alpha} \leq 0.3 \quad (۵)$$



شکل ۲ ناحیه‌ی تداخل جریان در پلان سرریز کنگره ای [1].

سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)

مدل‌های فازی- عصبی که در سال ۱۹۹۳ توسط جنگ گسترش یافت، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی- مصنوعی (ANN(Artificial Neural Networks، برای تسهیل فرآیند یادگیری و انطباق ترکیب می‌نماید [6]؛ بدین صورت که مشکل اصلی در طراحی سیستم‌های فازی را که همان به‌دست آوردن قواعد «اگر-آنگاه» فازی است به‌وسیله‌ی استفاده‌ی مؤثر از قابلیت یادگیری ANN جهت تولید خودکار این قواعد و بهینه‌سازی پارامترها برطرف می‌کند. مدل ANFIS از جمله مدل‌های فازی- عصبی است [۷]. این شبکه براساس یادگیری نظارت شده آموزش داده می‌شود. بنابراین، هدف ما دادن آموزش به شبکه‌ی تطبیقی است تا بتواند توابع غیرمعین داده‌شده توسط داده‌های آموزش را تخمین بزند و سپس مقادیر دقیق پارامترهای فوق را بیابد. در این روش، ANFIS یک الگوریتم آموزش ترکیبی شامل روش کاهش شیب و روش حداقل مربعات را به‌کار می‌گیرد تا پارامترها را بهینه نماید [9].

نوع سیستم استنتاج فازی به‌کار رفته در این تحقیق سیستم سوگنو با توابع عضویت گوسین می‌باشد. برای آموزش مدل از الگوریتم آموزش ترکیبی با تعداد تکرار epoch=30 استفاده گردید.

داده‌های مورد استفاده. با توجه به توضیحات داده‌شده، در این تحقیق از داده‌های سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای استفاده گردید. سرریزهای مورد مطالعه در تحقیق مذکور به‌شکل کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با تاج نیم‌دایره‌ای به شعاع و ضخامت $\frac{P}{6}$ بوده و برای عرض ثابت w و تعداد سیکل‌های ۱/۵ و هم‌چنین مقادیر α با تغییرات ٤۹، ۳۲، ۲۱، ۱٦، ۱۰/۵ =α ساخته شده‌اند که α عبارتست از زاویه‌ی دیواره‌های سرریز. با گذراندن دبی‌های مختلف از روی هر کدام از این سرریزها و با به‌دست آوردن H_t، نمودارهایی بر حسب و C_d برای αهای مختلف ترسیم شده‌اند. سپس از این نمودارها برای طراحی سرریز کنگره‌ای استفاده نمودند. مشخصات در تحقیق حاضر سعی شده است تا با استفاده از داده‌های موجود شامل سه متغیر ورودی، زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز در امتداد جریان(α)، نسبت ارتفاع کل آب به ارتفاع سرریز($\frac{H_t}{p}$) و طول دماغه (A)

با متغیر خروجـی ضـریب گـذردهی جریـان (C_d) بـه ساخت مدل‌های فازی-عصبی ANFIS پرداخته شـود. بدین صورت می‌توان از روابط بـه‌دسـت‌آمـده از مـدل استفاده نمود و به محاسبه‌ی ضریب گذردهی جریان از روی داده‌های ورودی جدید پرداخت. بـرای سـاخت سیسـتم اسـتنتاج فـازی و سـپس محاسـبه‌ی ضـریب گذردهی جریان بر پایه‌ی الگوهـای ورودی-خروجـی در دسترس مجموعاً ۹٦ زوج داده مورد استفاده قـرار گرفت که ۸۰ درصد آن برای آموزش مـدل ANFIS و ۲۰ درصد آن برای ارزیابی مدل بـه‌کـار رفـت. قـوانین فازی با استفاده از روش خوشه‌بنـدی کاهشـی سـاخته شد.

نتایج به‌دست‌آمـده از مـدل‌هـا. بـه‌منظـور ارزیـابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی ساخته‌شده در این تحقیـق، از سه شاخص آماری زیر استفاده شده است:

۱- ضــریب هــم‌بســتگی CORR(Correlation Coefficient) مطابق با رابطه‌ی (٦).

$$\mathrm{CORR} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i^o - \bar{x}^o)(x_i^p - \bar{x}^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i^o - \bar{x}^o)^2 \sum_{i=1}^{n}(x_i^p - \bar{x}^p)^2}} \qquad (٦)$$

۲- ریشه‌ی میانگین مربع‌های خطا RMSE (Root Mean Square Error) مطابق با رابطه‌ی (۷).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i^o - x_i^p)}{n}} \qquad (۷)$$

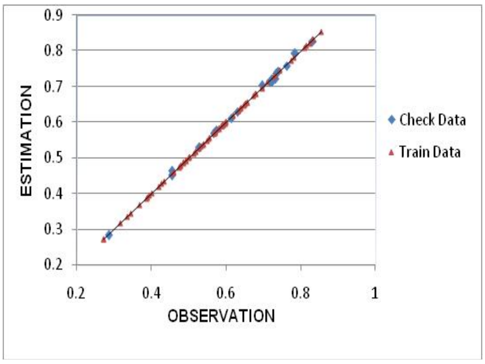
۳- میانگین قدر مطلق خطا (Mean Absolute Error) MAE مطابق با رابطه (۸).

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i^o - x_i^p\right|}{n} \qquad (۸)$$

که در روابط فوق، پارامتر مشـاهده شـده، پـارامتر تخمین‌زده شده و n تعداد داده‌هاست. شاخص CORR نمایانگر میـزان رابطـه بـین داده‌هـای مشـاهده‌شـده و تخمین زده‌شده است. این ضـریب در بـازه‌ی ۱- و ۱+ تغییـر و هرچـه مقـدار آن بـه ۱+ نزدیـک‌تـر باشـد، نشـان‌دهنـده‌ی قـوی‌تـر بـودن رابطـه‌ی مستقیم بـین متغیرهای مورد بررسی مـی‌باشـد. RMSE باقیمانـده‌ی بین داده‌های مشاهده‌شده و تخمین‌زده شده را ارزیـابی می‌نماید. این شـاخص فـرض مـی‌کنـد کـه خطاهـای بـزرگ‌تـر از اهمیـت بـیش‌تـری نسـبت بـه خطاهـای کوچـک‌تـر برخوردارنـد. MAE نیـز میـانگین وزنـی خطاهای مطلق می‌باشد. لازم به ذکر است کـه RMSE و MAE نزدیک‌تر به صفر، تناسب بیشتر بین متغیرها را نشان می‌دهند [۱۰و9]، جدول (۱). شامل ارزیابی نتایج به‌دست‌آمـده از مـدل بـا توجـه بـه پارامترهـای فـوق می‌باشد هم‌چنین نمودار شـکل (۳) نیـز بـه مقایسـه‌ی پراکندگی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی C_d می‌پردازد:

جدول ۱ نتایج ارزیابی مدل ANFIS ساخته‌شده[۱۱]

تعداد قوانین	آموزش		ارزیابی	
	CORR	۱	CORR	۰/۹۹۹۳
10	RMSE	۰/۰۰۰۲۲۲۷	RMSE	۰/۰۰۵۱
	MAE	۰/۰۰۰۱۷۱	MAE	۰/۰۰٤۲۳



شکل ۳ نمودار پراکندگی مقادیر مشاهداتی و تخمین زده‌شده Cd [۱۱].

در تحقیق حاضر ابتدا مدل فازی-عصبی ANFIS در تخمــین ضــریب گــذردهی جریــان ســرریزهای کنگره‌ای پرداخته شد. اگرچه داده‌های در دسترس به

دلیل هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین وقت‌گیر بودن آن معمولاً محدودند، اما می‌توان با استفاده از روش ارائه‌شده در این تحقیق، الگوی موجود بین متغیرهای مختلف ورودی و خروجی را تشخیص داد و با صرف کم‌ترین هزینه و زمان نسبت به ارائه‌ی نتایج برای بازه‌ی تغییرات پارامترهای دخیل با دقت مناسب اقدام نمود .

روابط بین پارامترهای سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای

با توجه به شکل(۱) روابط موجود بین پارامترهای سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای جهت بهینه‌یابی در زیر توضیح داده شده است. عرض هر یک از سیکل‌ها: $w = \frac{W_c}{N}$، زاویه‌ی دیواره‌ی هادی: $\alpha = \tan^{-1}(\frac{W-2A}{2B})$، طول دماغه (A): $A = x\% \frac{W}{2sin\alpha}$ می‌باشند. در این تحقیق طول دماغه به‌صورت درصدی از طول کل سرریز کنگره‌ای مثلثی با طول دماغه‌ی صفر درنظر گرفته شده است. طول خارجی دماغه (D): $D = A + 2T_w . \tan(45 - \frac{\alpha}{2})$، طول ساخته‌شده‌ی یک زانو از تاج سرریز (L_1): $L_1 = \frac{W-A-D}{2sin\alpha}$، طول مؤثر یک زانو از تاج سرریز (L_2): $L_2 = L_1 - T_w . \tan(45 - \frac{\alpha}{2})$، طول کل دیواره‌ها (L): $L = N.(2 L_1 + D + A)$ ، عرض سرریز به موازات جریان ورودی (B): $B = L_1 . \cos\alpha + T_w$ می‌باشند. طول مؤثر کل: $L_e = 2N(L_2 + A)$ و ارتفاع آب روی سرریز :H می‌باشد.

محاسبات احجام برای تخمین مصالح و هزینه‌ها

در محاسبه مجموع عملیات زیر درنظر گرفته شد. دیواره‌های سرریز: $V_w = N.L.P.T_w$، دیواره‌های انتها: $V_e = (P + H_t + F_b).(B + H_t).2.T_w$
دال: $V_s = (B + 2H_t).w_c.T_S$ می‌باشند.

معرفی متغیرها و پارامترهای بهینه سازی

داده‌های ورودی شامل حداکثر مجموع ارتفاع تاج سرریز و ارتفاع آب روی تاج آب در مخزن ($P + H_t$)، دبی طرح (Q_{design})، ارتفاع آزاد (F_b) ، ضخامت دیوار سرریز (T_w)، ضخامت دال سرریز (T_s).

در این تحقیق از یک کروموزوم پنج‌ژنی استفاده گردیده است. ژن‌های این کروموزوم به ترتیب، ارتفاع تاج سرریز (P)، ارتفاع کل آب روی تاج سرریز(H_t)، تعداد سیکل سرریز (N)، درصد طول دماغه و زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز در امتداد جریان (α) می‌باشند. کلیه‌ی متغییرها از نوع پیوسته‌اند ، به‌جز تعداد سیکل‌های سرریز که از نوع متغیر گسسته محسوب می‌شوند.

تابع هدف در این تحقیق تابعی است که نتیجه‌ی جمع زدن پارامتر های حجمی در هزینه‌ی ساخت سرریز کنگره‌ای توأم با ارضای شرایط هیدرولیکی مناسب با افزایش گذردهی جریان می‌باشد.

$$\text{minimize} \rightarrow f(x) = NLPT_w + (P + H_t + F_b) \times (B + H_t) \times 2T_w + (B + 2H_t) \times w_c \times T_S$$

اولین و مهم‌ترین قید، ارضای شرایط هیدرولیکی مناسب سرریز یا ارضای شرط هیدرولیکی می‌باشد. سایر قیود بر اساس پارامتر های مؤثر ارائه گردیده‌اند.

$$Q_l = \frac{2}{3} C_d Le \sqrt{2g} {H_t}^{1.5} Q_{design} \quad (۱)$$

$$\frac{H_t}{P} < 0.9 \quad (۲)$$

$$\frac{w}{p} > 2. \quad (۳)$$

$$\frac{l}{w} < 9.5 \quad (۴)$$

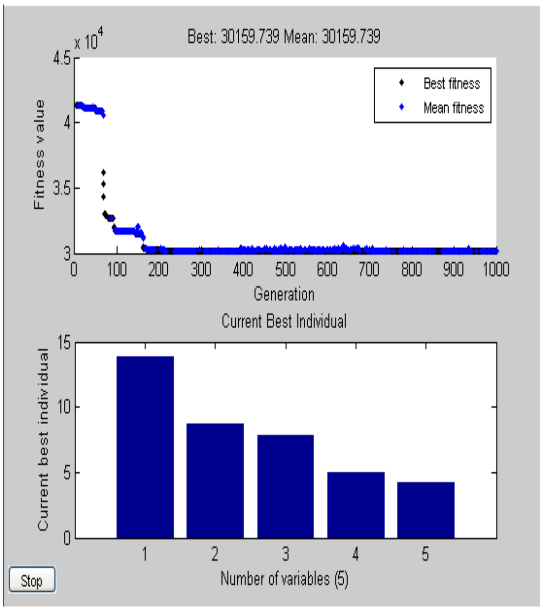
$$\frac{L_{de}}{L_1} = \frac{H}{L_1} \times 6.1 \times e^{-0.052\alpha} \leq 0.3 \quad (۵)$$

مطالعه موردی سد Ute در آمریکا

سد Ute یک سـد خـاکی بـه ارتفـاع ۳۷ مترمـی‌باشـد. ساخت سد در سال ۱۹٦۳ به اتمام رسید. ایـن سـد بـر روی رودخانـه Canadian در نیـو مکزیکـوی مرکـزی احداث گردیده اسـت. سـرریز اولیـه‌ی ایـن سـد یـک سرریز روگذر اوجی با طول ۲۵٦ متر بود و به گونه‌ای طراحی شده بود که بتوان به‌منظـور افـزایش مخـزن از سیستم کنترل دریچـه‌ای در آن اسـتفاده نمـود. پـس از چنـد سـال مسـؤولین امـر از USBR خواسـتند تـا راه‌حل‌هایی را به‌منظور اصـلاح سیسـتم موجـود ارائـه دهند. ارزیابی طـرح‌هـا نشـان داد کـه هزینـه‌ی نصـب سیستم کنترل دریچه‌ای بالغ بر ۳٤ میلیون دلار خواهـد شد. پـس از بررسـی چنـد راه حـل دیگـر اسـتفاده از سرریز کنگره‌ای با هزینه‌ی ۱ میلیون دلار با صرفه‌تـرین راه‌حل تشخیص داده شـد. بـدین لحـاظ یـک سـرریز کنگره‌ای برای همان عرض کل ۲۵٦ متر بـه تعـداد ۱٤ سیکل و طول معادل ۱۰۲٤ متر ساخته شد. این سـرریز که در سـال ۱۹۸۳ تکمیـل شـد مـی‌توانـد تحـت بـار هیـدرولیکی ۵/۷۹ متـر، سـیلابی معـادل ۱۵۵۷۵ متـر مکعب در ثانیه را از خود عبور دهد.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل بهینه‌سازی

در این تحقیق همان طورکـه ذکـر شـد از مـدل فـازی عصبی برای آموزش داده‌هـا و الگـوریتم ژنتیـک بـرای بهینه کردن هندسه‌ی سـرریز کنگـره ای بـرای کـاهش هزینه‌ی ساخت و ارضای شرایط هیـدرولیکی مناسـب مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بـه‌دسـت‌آمـده از اجرای برنامه طرز مناسبی نشان می‌دهد که طرح بهینـه جای‌گزین مناسبی برای طرح کنونی می‌باشـد. ایـن در حالی است که طرح پیشنهادی ظرفیـت عبـوری مـورد نظـر را داشـته و در عـین حـال در حـدود ۱۳/۳٤٪صرفه‌جویی در هزینه‌هایی اجرایی را نیز در بـر دارد. پارامترهـای هندسـی طـرح پیشـنهادی و طـرح موجود به شرح جدول (۲) می‌باشد. هـم‌چنـین شـکل (٤) نتایج به‌ترین مقادیر تابع صلاحیت در هـر نسـل را نشان می‌دهد.



شکل ٤ بهترین مقادیر تابع صلاحیت در هر نسل [۱۱]

جدول ۲ مقایسه‌ی طرح فعلی با طرح پیشنهادی [۱۱].

پارامتر	طرح موجود	طرح بهینه
ارتفاع سرریز(p)	۹/۱	۷/۸۵
ارتفاع کل آب روی سرریز(Ht)	۵/۷۹	۵
عرض تک سیکل(w)	۱۸/۳	۳۰
طول دماغه(A)	۱/۵	۲/٦٤
تعداد سیکل‌های سرریز(N)	۱٤	۸/۵
نسبت بزرگنمایی($\frac{l}{w}$)	٤	۳/۵٦
عرض‌سرریزدرامتدادجریان(B)	۳۸/۸۳	٤۷/٦
طول کل تاج(L)	۱۰۳۱/۸	۸۷۲/۷٦

نتیجه گیری

مدل تئوری ارائه‌شده در این تحقیق، مدل بهینـه‌سـازی هندسه‌ی سـرریز کنگـره‌ای ذوزنقـه‌ای بـا تـابع هـدف

کمینه‌سازی هزینه‌ها (حجم بتن سرریز) و ارضای شرایط هیدرولیکی و محدود بودن پارامتر های مؤثر می‌باشد. در این تحقیق ابتدا با مدل فازی-عصبی (ANFIS) در تخمین ضریب گذردهی جریان سرریز پرداخته شد. اگرچه داده‌های در دسترس به‌دلیل هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین وقت‌گیر بودن آن معمولاً محدودند، اما می‌توان با استفاده از روش ارائه‌شده در این تحقیق، الگوریتم موجود بین متغیرهای مختلف ورودی و خروجی را تشخیص داد و با صرف کم‌ترین هزینه و زمان نسبت به ارائه‌ی نتایج برای بازه‌ی تغییرات پارامترهای دخیل با دقت مناسب اقدام نمود. در انتها با استفاده از خروجی مدل ANFIS و الگوریتم ژنتیک با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها (حجم بتن سرریز) و ارضای شرایط هیدرولیکی و محدود بودن پارامترهای مؤثر به بهینه‌سازی هندسه‌ی سرریز پرداخته شد. انتخاب روش جهش و تقاطع و همچنین فرمولاسیون مسأله منجر به همگرا شدن نتایج شده است که این مسأله دلیلی بر صحت روش‌ها و مدل ذکرشده می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش با مقادیر موجود از وزن بتن به‌کار رفته در وضعیت فعلی تا ۱۳/۳۴٪ کاهش هزینه‌ها را نشان می‌دهد که این مسأله بیانگر نتایج بسیار مناسب این روش می‌باشد.

مراجع

1. Falvay , H.,"*Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*," ASCE Press Pub., Virginia, USA, (2003).
2. Tullis, J. P., Nosratollah, A. and Waldron, D., "Design of labyrinth spillways", *J. Hydraul. Eng.*, 121_3_, 247–255, (1995).

۳. بارانی،غ.، ناصری، س.، «بهینه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از مدل‌های فیزیکی»، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز، (۱۳۸۲).

4. Taylor, G., "The performance of labyrinth weirs", PhD thesis, Univ. of Nottingham, U.K. (1968).
5. Lux III, F.L. and Hinchcliff, D., "Design and Costruction of Labyrinth Spilways", *Proc. 15th International Congress on Large Dam*, Vol. 4, Q. 59, R, PP.249-274, International commission on Large Dams, Paris, France, (1985).
6. Jang, J.-S.R., "ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system", *IEEE Transactions on Systems,* Man and Cybernetics, 23 (3), 665–683, (1993).

۷. انوری ص.، «ارتقای مدل‌های هوشمند جهت پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از داده‌های توزیع مکانی اقلیمی و سطح برف»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۷).

8. Nayak, P., Sudheer, K., Rangan, D. and Ramasa, K., "A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series", *Journal of Hydrology*, Vol. 291, pp. 52–66, (2004).
9. Chang, F. -J., Chang, Y. -T., "Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir", *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 1–10, (2006).

۱۰. حسین‌پور نیکنام، ح.، «استفاده از مدل فازی-عصبی و شاخص‌های اقلیمی برای پیش‌بینی خشکسالی مطالعه موردی زاهدان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، (۱۳۸۸).

۱۱. جعفری ندوشن، ا.، «بررسی ضریب گذردهی سرریزهای کنگره‌ای به روش CFD و بهینه‌سازی هندسه سرریز با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک» ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران سازه های هیدرولیکی ، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، (۱۳۸۹).

12. Goldberg, D.E., "Genetic Algorithm for Search", *Optimization and Machine Learning*, Reading, MA; Addison-Wesley, (1989).

۱۳. ملابهرامی ا.، محمودی م.، «مقدمه‌ای بر الگوریتم‌های ژنتیک»، چاپ اول، آراسته، قم، (۱۳۸٤)